



Spécification d'exigences physico-physiologiques d'interaction homme-machine en ingénierie système

Gérard Morel, Jean-Marc Dupont, Romain Lieber, Fabien Bouffaron,
Dominique Méry, Frédérique Mayer, Jean-Luc Marty

► To cite this version:

Gérard Morel, Jean-Marc Dupont, Romain Lieber, Fabien Bouffaron, Dominique Méry, et al.. Spécification d'exigences physico-physiologiques d'interaction homme-machine en ingénierie système. Génie logiciel : le magazine de l'ingénierie du logiciel et des systèmes, 2013, Mars 2013 (104), pp.29-39. hal-00805851

HAL Id: hal-00805851

<https://hal.science/hal-00805851>

Submitted on 29 Mar 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Spécification d'exigences physico-physiologiques d'interaction homme-machine en ingénierie système

GERARD MOREL¹, JEAN-MARC DUPONT¹⁺², ROMAIN LIEBER¹, FABIEN BOUFFARON¹,
DOMINIQUE MERY¹, FREDERIQUE MAYER¹ ET JEAN-LUC MARTY³

(1) {gerard.morel, romain.lieber, fabien.bouffaron, dominique.mery, frederique.mayer}@univ-lorraine.fr

(2) jmd@so-innov.fr (3) jean-luc.marty@astrium.eads.net

Résumé : Les travaux exploratoires relatés dans le présent article portent sur la spécification d'exigences physico-physiologiques mesurables afin de mieux prendre en compte ce type de facteurs humains en ingénierie d'un système technique contrôlé par un humain. Le cas d'étude qui sert de fil conducteur tout au long de cet article est celui du contrôle par divers opérateurs d'un mécanisme de sécurisation satisfaisant une exigence opérationnelle de fermeture verrouillée de la porte d'accès à un équipement lors de la clôture d'une intervention de maintenance pour remise en condition opérationnelle d'un appareil. Ce processus de spécification combine dans un premier temps un cadre de *Modélisation Système* avec celui *Mathématique et Computationnel de la Physiologie Intégrative*. Cette spécification d'une interaction de perception est vérifiée dans un deuxième temps par exécution de modèles «SysML» interagissant avec des modèles physico-physiologiques en ingénierie d'un système support de maintenance dans notre cas d'étude.

Mots clés : Ingénierie système basée sur des modèles, facteurs humains, physiologie intégrative, SysML

1. INTRODUCTION

Divers articles ont récemment mis en évidence l'importance de dépasser le périmètre prescrit de l'ingénierie technique d'un système pour prendre en compte au plus tôt l'ensemble des interactions d'un système sociotechnique, principal et support, dans son environnement opérationnel afin de maintenir les comportements émergents non intentionnels dans des limites acceptables [1]. Cette synergie entre le système technique et le système socio-organisationnel s'avère aussi nécessaire pour développer des interfaces interopérables reflétant la correspondance homomorphique entre les situations d'états de procédés à risque et les schémas mentaux des exploitants percevant ces phénomènes variables à contrôler [2]. Cette prise en compte des facteurs humains en ingénierie de systèmes conduit ainsi à se focaliser sur la performance positive de l'ensemble des interactions homme-machine, homme-homme et système-environnement. Et à ne pas se focaliser sur le seul confinement robuste de l'erreur humaine en raison de la forte contingence des situations opérationnelles à des contextes variables [3].

Ces interfaces diverses sont le siège d'interactions émergentes complexes [4], certaines recherchées pour faciliter la performance globale visée ainsi que la résilience face à un environnement perturbateur non anticipé, d'autres construites pour finaliser le système en

regard de sa mission.

Le paradigme exploré par ces travaux se fonde sur la possibilité de faire interopérer des modèles de processus physiologiques avec des modèles de processus techniques en construction d'interactions homme-machine [5]. Cet article porte plus précisément sur la spécification finalisée d'une interaction physico-physiologique en *Ingénierie Système Basée sur des Modèles*.

2. ÉTUDE DE CAS DANS LE DOMAINE DE LA MAINTENANCE D'UN EQUIPEMENT

La sécurisation de la fermeture verrouillée d'une porte d'un équipement est couramment assurée par un mécanisme technique M_{LL} composé de deux moyens distincts interdépendants, l'un « *Latch* » servant à maintenir la porte fermée, l'autre « *Lock* » assurant son maintien sur la porte. Ce type de mécanisme est complété par divers moyens ou procédures complémentaires de commande et de surveillance prévenant toute ouverture intentionnelle ou par inadvertance, notamment dans le cas des blocs porte-passager caractéristiques des systèmes de transport [6].

La situation opérationnelle à laquelle nous nous intéressons diffère et reflète la variabilité contextuelle d'une interaction sociotechnique puisque ce contrôle de l'état *Fermé* \wedge *Verrouillé* d'une porte d'accès à un équipement est effectué par divers opérateurs de terrain. Par exemple, le

technicien d'entretien doit compléter la manipulation du mécanisme M_{LL} par la vérification d'une exigence d'alignement *porte-équipement* A_{LL} (table 1) après avoir effectué les tâches ciblées par la procédure d'intervention P_{LL} (figure 1).

R_{LL}	«Operational Requirement» Make sure that the doors are fully latched when closed
A_{LL}	«Operational Requirement» Make sure that all latch handles stay in the doors slots and are aligned with the equipment adjacent surface
REC_{LL}	«Operational Requirement» Proceed to a visual inspection of all parts easily visible of the latches after each manipulation and correct any abnormality before operating the equipment
REX_{LL}	«Operational Requirement» Do not leave this job after closing the doors, continue on to secure the latches. If you are called away prior to latching, then either re-open one door or latch the latches before walking away from the equipment

Table 1 : exemples d'exigences opérationnelles de *Fermeture/Verrouillage* d'une porte d'accès à un équipement

<ul style="list-style-type: none"> - Ouvrir la porte - Déverrouiller le verrou - Détacher le crochet - Soulever les portes (intérieur et extérieur) - Ancrer les bielles - Exécuter la tâche d'entretien - Désancrer les bielles - Abaisser les portes (intérieur et extérieur) - Attacher le crochet - Verrouiller le verrou - Fermer la porte
--

Figure 1 : Procédure P_{LL} d'actionnement du mécanisme M_{LL} par un opérateur H_{LL}

D'autres intervenants, appartenant parfois à des équipes différentes, peuvent compléter ce contrôle perceptif visuel, tactile, voire auditif (*clic* d'enclenchement d'un crochet) afin de satisfaire l'exigence R_{LL} (table 1) de remise en condition opérationnelle de l'équipement lors de la clôture d'une intervention ou d'une inspection.

Bien que P_{LL} et M_{LL} soient bien construits d'un point de vue cognitif [7], linguistique et technique, divers rapports d'incidents ont montré que cette bonne exécution est contingente aussi bien à des contextes sociotechniques variés d'exploitation d'un équipement qu'à son intégration dans divers appareils. En retour d'expériences incidencielles, la difficulté de garantir opérationnellement R_{LL} a conduit à diverses recommandations telles que REC_{LL} et

REX_{LL} (table 1), aussi bien par l'équipementier que par l'exploitant.

S'il conviendrait de s'interroger sur l'impact cognitif de ces avertissements et recommandations émergents en cours d'exploitation, nos travaux ont porté sur la spécification *a priori* de ce type d'exigence de contrôle perceptif par un opérateur humain.

3. MODELISATION D'UNE INTERACTION PHYSICO-PHYSIOLOGIQUE DE PERCEPTION

Une première difficulté est de formaliser cette interaction dans un cadre plus général de modélisation d'un système homme-machine comme un *TOUT* pour définir ce qui est essentiel à chacun des facteurs d'échelle à considérer [8].

Nos travaux s'appuient sur une interprétation d'un modèle de référence de système sociotechnique [9] qui adapte un ensemble de travaux de formalisation du processus de spécification dans l'approche des «*Problem Frames*» en génie logiciel [10].

Ils s'appuient aussi sur des travaux antérieurs qui complètent formellement le mécanisme de substantivation de «*NIAM/ORM*¹» pour construire un modèle de système² par *émergence finalisée* [11]. Cette construction est en outre facilitée par la possibilité d'explicitier en *Langage Naturel Binaire* des faits entre objets de domaines différents, tout en garantissant la cohérence ensembliste du modèle résultant.

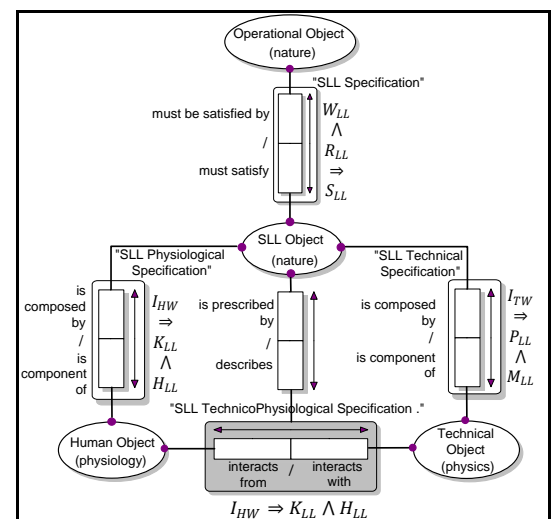


Figure 2 : Modélisation « NIAM-ORM » du processus de spécification du système S_{LL} à faire

Le prédicat à satisfaire $W_{LL} \wedge I_{TW} \wedge I_{HW} \wedge I_{TH} \Rightarrow R_{LL}$ met en évidence que trois types de spécifications concourent de façon itérative à définir (développer, déployer ...) le système S_{LL} à faire selon $I_{TW} \wedge I_{HW} \wedge I_{TH} \Rightarrow S_{LL}$:

- W_{LL} restreint, dans notre cas, le domaine d'intérêt au sous-domaine d'exploitation d'un appareil pour spécifier le système à faire selon : $W_{LL} \wedge S_{LL} \Rightarrow R_{LL}$.
- I_{TW} spécifie les exigences techniques du système à faire prescrivant la procédure opératoire P_{LL} pour mettre en œuvre M_{LL} en W_{LL} selon : $W_{LL} \wedge M_{LL} \wedge P_{LL} \Rightarrow I_{TW}$.
- I_{HW} spécifie les exigences facteurs humains du système à faire prescrivant les capacités K_{LL} que doit avoir l'Humain H_{LL} pour opérer en W_{LL} selon : $W_{LL} \wedge H_{LL} \wedge K_{LL} \Rightarrow I_{HW}$.
- I_{TH} spécifie les exigences d'interopération homme-machine du système à faire prescrivant les propriétés d'interface en W_{LL} selon : $W_{LL} \wedge K_{LL} \wedge P_{LL} \Rightarrow I_{TH}$.

3.1 Point de vue facteurs humains de l'interaction de perception ITH

Un raffinement de cette interaction I_{TH} est de donner une vue facteurs humains de cette *perception-action* comme un TOUT de façon à ce que l'état *Fermé* \wedge *Verrouillé* porté par l'Objet Technique M_{LL} soit bien perçu par l'Objet Humain H_{LL} pour bien agir .

Dans la mesure où cette information d'état n'est pas continûment transmise, cette relation *perception-action* entre deux objets de natures différentes s'interprète par une correspondance *signifié-signifiant* contingente au contexte d'activité [12]. Les propriétés physiques d'affordance³ de l'objet-interface qui stimule la perception pour agir (figure 3) sont particulièrement importantes en spécification d'interface homme-machine [3] [13], bien que ce concept d'affordance [14] soit sujet à interprétations [15] [16] [17].

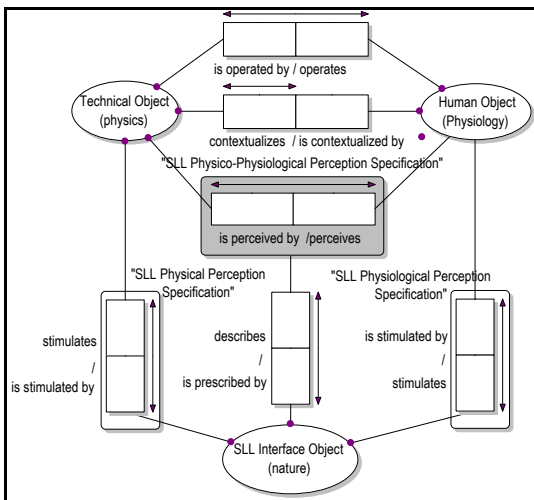


Figure 3 : Modélisation « NIAM-ORM » du processus de spécification de l'interaction perceptive I_{TH}

Pour finaliser cet objet émergent, nous avons considéré que c'est la nature physico-

physiologique de cette stimulation qui peut permettre de quantifier *a priori* des exigences mesurables comme requis en ingénierie système. En d'autres termes, l'idée est de spécifier les conditions physico-physiologiques nécessaires de réussite de l'activité, bien que non suffisantes d'un point de vue facteurs humains en situation sociotechnique de maintenance.

3.2 Point de vue technique de l'interaction de perception ITH

Un autre raffinement de cette interaction I_{TH} est de donner une vue logique de cette *perception-action* de façon à ce que l'état *Fermé* \wedge *Verrouillé* porté par l'Objet Technique M_{LL} soit bien perçu par l'Objet Humain H_{LL} pour que rien de mauvais ne puisse lui arriver .

La construction prouvée en « *Event B*⁴ » de ce modèle (figure 4) conduit à spécifier que deux signaux logiques « *seeclose* » et « *seelatch* » semblent nécessaires pour garantir la perception correcte requise. L'analyse conduit à un ensemble de variables modélisant, d'une part, les opérations d'ouverture et de fermeture et, d'autre part, les variables d'observation liées à l'observateur. L'exigence de sûreté R_{LL} est interprétée par l'invariant logique 4 à préserver tout au long du processus de raffinement en ingénierie système et incrémentalement construit.

VARIABLES
pos, seeclose, seelatch, s
INVARIANTS
inv1 : <i>seelatch</i> \in STATES
inv2 : <i>seelatch</i> = ko \Rightarrow s = UNLOCKED
inv3 : <i>seelatch</i> = ok \Rightarrow s = LOCKED
inv4 : <i>seeclose</i> = ok \wedge <i>seelatch</i> = ok \Leftrightarrow s = LOCKED \wedge pos = 0

Figure 4 : Invariant logique 4 de Fermeture \wedge Verrouillage à préserver

3.3 Point de vue physiologique de l'interaction de perception ITH

Un dernier raffinement de cette interaction I_{TH} est de donner une vue physiologique de cette *perception-action* de façon à ce que l'état *Fermé* \wedge *Verrouillé* porté par l'Objet Technique M_{LL} stimule correctement l'information correspondante K_{LL} apprise par l'Objet Humain H_{LL} pour bien décider .

Cette hypothèse de contingence de l'interaction *perception-action* à la bonne stimulation physico-physiologique ψ_{LL} se fonde sur un ensemble de travaux en physiologie de la perception et de l'action [18] ainsi qu'en physiologie intégrative [19]. Ce cadre *Mathématique de la Théorie de la Physiologie Intégrative (MTIP)* vise notamment à faciliter une représentation fonctionnelle du vivant par

une modélisation de processus physiologiques hiérarchiquement imbriqués dans l'espace-temps et stimulés par un ensemble d'interactions événementielles de type :

$$\begin{array}{c} \psi_{LL} \\ \text{Source}_{LL} \Rightarrow \text{Puits}_{LL} \end{array}$$

La construction de modèles explicatifs (figure 5) permet de comprendre que l'interaction ψ_{LL} de *perception-cognition* se propage en stimulant des processus physiques et physiologiques à travers des discontinuités structurelles qui transmutent sa nature. Cette interaction ψ_{LL} déclenche *in fine* les processus mentaux menant à l' action_{LL} à partir de l'information correspondante K_{LL} mémorisée dans la région r'' dédiée du cortex cognitif. Une vision *boîte blanche* par analogie avec le fonctionnement d'un thyristor pour chacun des processus imbriqués dans l'équation globale de champ met ainsi en évidence l'importance de la bonne spécification du flux physique *stimuli-source* ψ_{LL} dès r' .

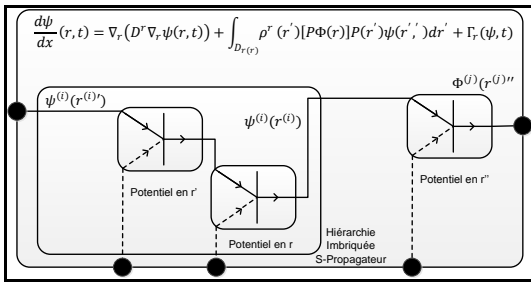


Figure 5 : Modélisation processive de la propagation physico-physiologique de l'interaction fonctionnelle ψ_{LL} d'une région r' à une région r'' pour stimuler une interaction cognitive

Au-delà de la construction de modèles explicatifs, cette synergie avec la modélisation de processus physiques [20] est renforcée par la base mathématique de la théorie des champs de la MTIP qui a vocation d'être computationnelle pour vérifier l'exécution de modèles avec un outil dédié « *PhysioMatica*^{TM5} ». Il est aussi envisageable de combiner ces modèles physiologiques computationnels avec d'autres, principalement de mécanismes biochimiques, à partir d'une base de modèles au format « *SBML*⁶ » par exemple.

4. SPECIFICATION D'EXIGENCES PHYSICO-PHYSIOLOGIQUES DE PERCEPTION D'ALIGNEMENT

Notre étude de cas porte sur la spécification *a priori* d'exigences mesurables de perception visuelle et/ou tactile par un opérateur afin de satisfaire l'exigence d'alignement A_{LL} après intervention. Ces modèles explicatifs facilitent la compréhension de l'ensemble des interactions

fonctionnelles *Source-Signal* \wedge *Puits-Cortex* impliquées dans ces processus de perception pour en spécifier les exigences (table 2).

D'un point de vue qualitatif, ces exigences facilitent la synergie entre ingénieries-spécialistes techniques et facteurs humains (K_{LL2} , $K_{LL2.1}$, $K_{LL2.6}$) tout au long d'un cycle de vie d'ingénierie système. D'un point de vue quantitatif, la mesurabilité de certaines de ces exigences requiert de disposer de données au sein du milieu physiologique à un facteur d'échelle qui nécessiterait des expérimentations spécifiques [21]. Ces mesures n'auraient de sens, par exemple, que pour spécifier dans des contextes critiques le profil électrophysiologique ($K_{LL2.5}$) de chacun des stimuli des cortex visuel et tactile, voire cognitif.

K_{LL2}	«Physiological Requirement» The Visual-Sink _{LL} must be aligned on the Signal-Source _{LL}
$K_{LL2.1}$	«Physiological Requirement» The anthropometric axes must be aligned according to the visual axis
$K_{LL2.5}$	«Physiological Requirement» The visual cortex must be stimulated according to this electrophysiological profile : $\sum_{i,j} \psi_{i,j}^{P4}$
$K_{LL2.6}$	«Physiological Requirement» The number of simultaneous sensitive stimulus Cp_{ij} in case of intentional action must be : $1 \leq nb(CP_{ij}) \leq 2$

Table 2 : Exemples d'exigences physiologiques de perception

4.1 Spécification d'exigences mesurables de perception visuelle d'alignement

Dans l'état des données disponibles et suffisantes pour démontrer la faisabilité de spécifier des exigences physico-physiologiques mesurables, une partie de notre étude a porté sur la perception visuelle de l'état *Fermé* \wedge *Verrouillé* des portes d'un équipement matérialisé par un signal de couleur orange peint sur le verrou (figure 6) en recommandation (REC_{LL} , table 1) de retour d'expérience incidentelle.

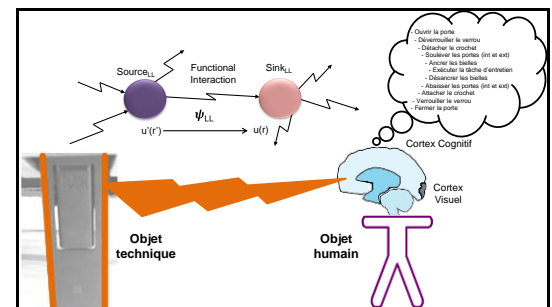


Figure 6 : Interactions fonctionnelles d'un processus physico-physiologique de perception visuelle

La stimulation adéquate qui doit être apportée par la *source-technique* au *puits-cortex* pour permettre la propagation de l'information stockée est la quantité suffisante de *courant électrique (ionique)* qui provient de la transmutation (photo-transduction) d'une certaine quantité de photons de couleur orange reçus au niveau de la région *fovéa* de l'œil (table 3, $K_{LL2.2}$). Notons que cette hypothèse de propagation d'un flux physique à travers le milieu physiologique de l'œil considéré comme un composant optique robuste relève d'une expertise physiologique telle qu'expliquée en §3.3. La modélisation de cette interaction physico-physiologique d'alignement *Source-Orange* \wedge *Puits-Fovéa* conduit à raffiner quantitativement l'exigence physiologique K_{LL2} (table 2) et à contraindre simultanément l'exigence technique M_{LL2} quant au flux émis. Cette même exigence d'alignement sur la *fovéa* et non pas sur la pupille contraint le *domaine-spécialiste facteurs humains* lui-même quant à l'alignement des axes anthropométriques d'un objet humain sur ceux de l'objet technique (figure 7).

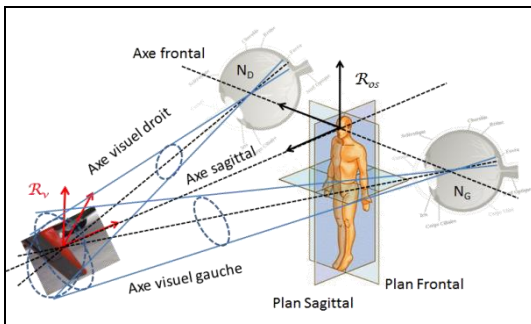


Figure 7 : Raffinement de l'exigence d'alignement A_{LL} sur l'axe sagittal

La mesurabilité de ce type d'exigence physico-physiologique de perception nécessite ainsi la synergie entre plusieurs ingénieries-spécialistes techniques et facteurs humains pour satisfaire une exigence-système d'alignement A_{LL} .

$K_{LL2.2}$	«Physiological Requirement» The photons flow received by the fovea must be specified according to the law : $nb\lambda = 2.10^{-13} / (hv) = 6.105 \text{ (s}^{-1}\text{)}$
$K_{LL2.3}$	«Physiological Requirement» The wavelength of the orange color must be between : $585 \text{ nm} \leq \lambda \leq 620 \text{ nm}$
M_{LL2}	«Technical Requirement» The reflectance coefficient ρ determines the fraction of the reflected power P_o versus the received power P_i according to : $P_o(x, t) = \rho P_i(x, t)$
$M_{LL2.3}$	«Technical Requirement» The latch must be aligned on the visual axis according to the transformation matrix : $Z_o = -{}^oT_v Z_v$

Table 3 : Interactions physico-physiologiques d'exigences mesurables

4.2 Vérification d'exigences mesurables de perception visuelle d'alignement

L'intérêt de la représentation mathématique de ces exigences physico-physiologiques est de permettre leur vérification par exécution de modèles computationnels avec des outils courants d'ingénierie. Il est possible de simuler des scénarii de rendu lumineux pour déterminer l'efficacité lumineuse physiologique requise pour percevoir ou pas le Signal Orange en fonction de la palette des *oranges*, du type de matériau, de la distance ou de la position des objets en interaction. Il est possible aussi de constater que l'efficacité lumineuse physiologique requiert un débit photonique plus important si la couleur orange est plus foncée (figure 8), voire de s'interroger sur la pertinence de ce choix de signal visuel.

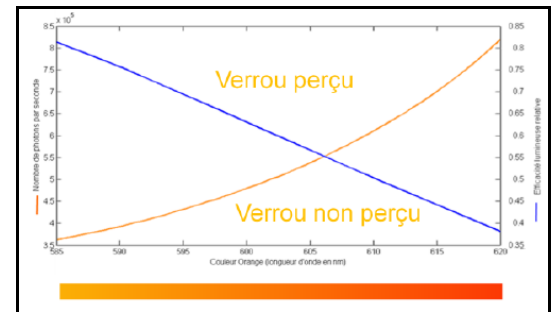


Figure 8 : Trace de scénario de simulation d'un processus physico-physiologique prototypé en Matlab®Simulink®

5. SPECIFICATION SYSTEME D'EXIGENCES PHYSICO-PHYSIOLOGIQUES DE PERCEPTION VISUELLE

Pour éprouver cette possibilité de faire interopérer des modélisations de processus techniques avec des modélisations de processus physiologiques en ingénierie système, nous nous sommes mis en situation de spécification d'un système support en maintenance.

5.1 Spécification système itérative

Ces travaux sur la connaissance de la boucle *perception-cognition-action* ont été une opportunité pour revisiter d'autres travaux relatifs au caractère itératif du processus de spécification système [22][23]. Ceci en complément de réflexions qui nous ont permis précédemment d'articuler les fondements de l'approche des « *Problem Frames* [24] » avec ceux de l'ingénierie système [25] .

Ce processus de spécification peut être vu comme un ensemble d'interopérations de *Description-Prescription* du type :

$$\Sigma_{LL} \Rightarrow \text{Source}_{LL} \Rightarrow \text{Puits}_{LL}$$

entre différents processus itérativement stimulés entre *Espace-Problème* et *Espace-Solution* des différents *Domaines W* [26] de compétences imbriqués. Un intérêt de ce méta-modèle de spécification système (figure 9) est notamment de différencier l'interaction stimuli relative à l'objet à spécifier, par exemple *Ensemble d'Exigences*, du potentiel d'action *Ensemble de Connaissances* de spécification de l'*Espace-Solution* du domaine sollicité. Un autre intérêt est de servir ainsi de pivot afin de faciliter la correspondance sémantique entre artefacts essentiels de langages de modélisation avec leurs outils associés, qu'ils soient standard de-facto comme « SysML/UML » ou spécifiques de domaines comme « *PhysioMatica* » dans notre cas.

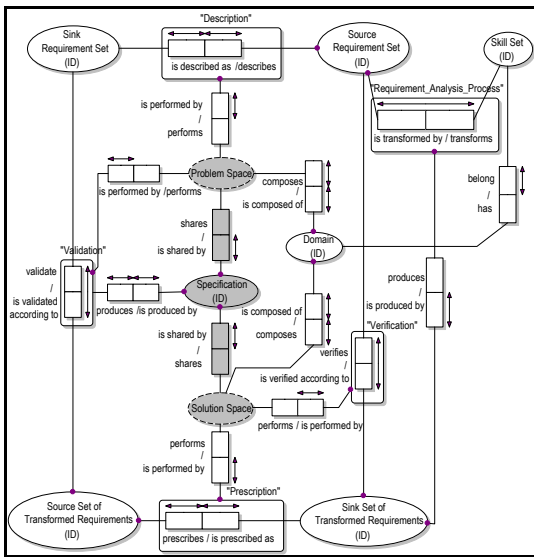


Figure 9 : Meta-modèle en « NIAM-ORM » d'une interopération de spécification système

5.2 Spécification système exécutable

Le scénario de la figure 10 décrit un contexte plausible de maintenance avec divers opérateurs ayant des rôles complémentaires _Chef Maintenance CMO, Chef Équipe CE, Technicien d'Entretien TEA_ pour satisfaire l'exigence opérationnelle R_{LL} . Ce scénario permet d'illustrer l'interopération de différents modèles pour spécifier les exigences physico-physiologiques de l'interaction d'alignement afin de satisfaire la recommandation opérationnelle REC_{LL} étudiée. Ce prototypage articule notre processus de spécification système avec la démarche « SysML-Harmony⁷ » pour vérifier par exécution de modèles l'analyse fonctionnelle du système à faire.

Ce type d'interaction est dans un premier temps spécifié de façon logique par un flux de service [26], décrivant dans notre cas le résultat de la

perception visuelle *Présence (Ou Non Présence)* du signal de couleur Orange.

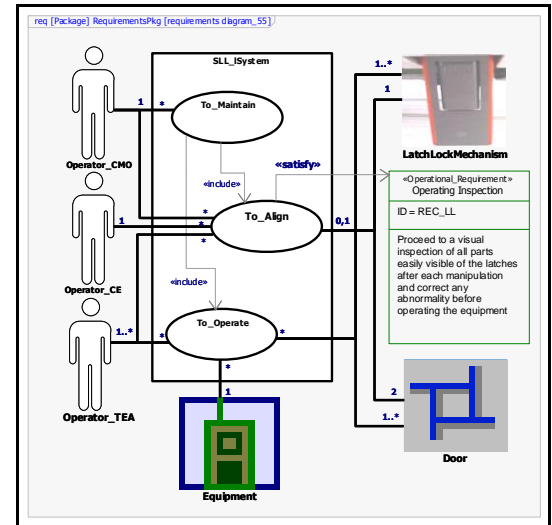


Figure 10 : Diagramme de cas d'utilisation du système à faire

Cette seule spécification logique n'est pas suffisante pour formaliser rigoureusement les exigences des interfaces, sièges d'interactions contextualisées de façon générale. Nos travaux confortent l'intérêt de co-simulations entre le domaine W_{IS} de l'ingénierie système et ceux des ingénieries spécialistes imbriquées. Dans notre scénario, nous décrivons plus précisément l'interopération entre l'*Espace-Solution* du domaine spécialiste en physiologie W_{FH} et l'*Espace-Problème* du domaine W_{IS} à une étape du processus global de spécification fonctionnelle système (figure 13). W_{FH} prescrit à W_{IS} , après vérification, un *Ensemble d'Exigences transformées* $\{K_{LL2}, K_{LL2.1}, K_{LL2.5}, K_{LL2.6} \dots\}$ à partir d'un *Ensemble de Connaissances* qui doit être respecté pour satisfaire cette interaction (figure 11).

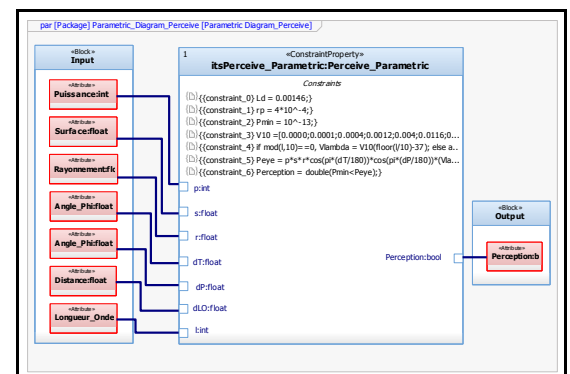


Figure 11 : Diagramme paramétrique décrivant l'interaction physico-physiologique de perception visuelle.

La validation de cette spécification partielle par l'*Espace-Problème* de W_{IS} devrait raisonnablement faire l'objet d'interopérations

avec le domaine technique W_T avant d'être prescrite à l' *Espace-Solution* de W_{IS} , en réitérant ce processus jusqu'à satisfaire REC_{LL} . Cette spécification fonctionnelle d'un système physico-physiologique comme un *TOUT* est représentée structurellement par un diagramme interne de bloc (figure 12) où l'objet « *Part Perceive* » est une instance de bloc de type « *Simulink* » dans lequel est décrit le comportement de l'interaction de perception visuelle spécifié par W_{FH} . La co-simulation par exécution de modèles décrivant le comportement événementiel de certains objets par des « *Statechart* » et le comportement temporel d'autres objets physiologiques par des équations physiques permet de vérifier et de tracer des scénarii pour chaque bloc système.

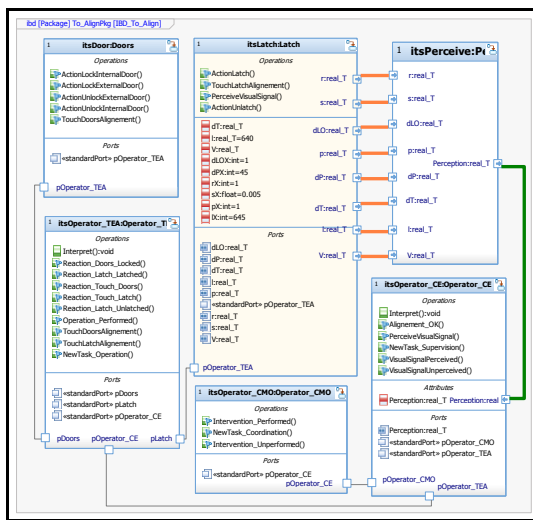


Figure 12 : Diagramme Interne de Bloc intégrant un bloc « *Simulink®* » spécifiant le comportement cas d'utilisation « *To Align* »

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ces travaux doivent être considérés comme très exploratoires en regard des résultats modestes obtenus pour satisfaire nos propres exigences de mesurabilité en physiologie. Nous pensons cependant avoir contribué à montrer qu'une synergie *technique – facteurs humains* était possible pour spécifier fonctionnellement, à certains facteurs d'échelles physiologiques, un système homme-machine comme un *TOUT*. Encore nous faut-il souligner que nous avons progressé dès lors que nous avons renforcé notre équipe par un expert intégratif en physique et physiologie.

Nous avons donc autant découvert que résolu au cours de cette difficile étude et nous en donnons quelques perspectives de travaux.

Nous avons montré l'imbrication des spécifications entre les domaines techniques et humains, questionnant quant à un processus de

spécification trop dichotomique. L'exigence d'alignement de perception visuelle se propage dans les deux domaines et leurs domaines connexes. Le nombre de signaux logiques à percevoir (au moins 2) pourrait être mis en perspective du nombre de composantes sensorielles physiologiques (au plus 2) perceptibles en situation intentionnelle.

Nous considérons que l'interopération entre domaines s'adressant à des objets de nature différente pourrait gagner à s'organiser différemment (figure 13), ne serait-ce, par exemple, qu'en partageant les mêmes artefacts pivot de spécification système. L'impact potentiel, relativement aux organisations traditionnelles, serait de préciser le périmètre et les responsabilités de l'architecte (ingénieur système) afin de synchroniser deux flots de spécifications : l'un technique et l'autre humain avec chacun leurs domaines connexes. Une hypothèse, devant être adaptée aux contraintes de l'organisation d'intérêt, pourrait consister à répartir les tâches entre un architecte système (tel qu'il est vu aujourd'hui) et des architectes système technique et système humain.

Cependant, une contrainte importante en regard des efforts à consentir est de pouvoir évaluer la criticité des phénomènes à étudier, par exemple en couplant des plates-formes dédiées à l'aspect cognitif [3] avec un environnement de spécification comme nous le proposons.

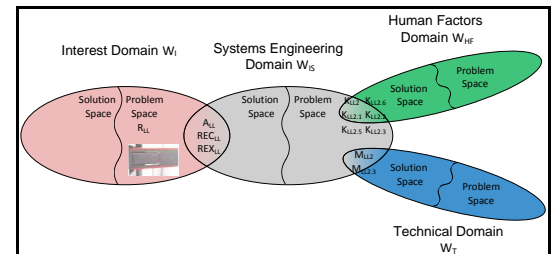


Figure 13 : L'ingénierie système, domaine pivot entre un domaine d'intérêt et deux domaines spécialistes respectivement technique et humain

L'affordance des objets a aussi été un sujet de réflexions quant à la perspective que l'objet technique *se fasse percevoir* pour susciter l'action. Nous avons exploré la possibilité en « *Design* » que ce soit l'objet technique qui guide la posture de l'humain lors de simulations numériques d'une situation de maintenance [27] pour limiter les degrés de liberté d'une étude en amont d'apprendissements *in-situ* en facteurs humains. *A contrario*, nous avons montré que la contingence de ces affordances au contexte d'exploitation pose les limites de certaines technologies infotroniques *intuitives* dans ces situations opérationnelles, dès lors que l'on s'accorde sur la criticité physique du stimuli

perceptif. S'il est maintenant admis que la simulation numérique de certains comportements de l'humain est pour un futur proche, nous avons contribué à montrer la nécessité de prendre en compte les propriétés physiologiques de certaines interactions, notamment en spécification de systèmes fortement contextualisés comme un système support en maintenance.

Enfin, ces travaux sur la connaissance de la boucle *perception-cognition-action* nous amènent à nous interroger sur le comportement intentionnel du modélisateur [28], par analogie avec le processus physiologique de propagation de l'interaction fonctionnelle.

7. REFERENCES

- [1] J.-R. Ruault, C. Colas, J.-C. Sarron et D. Luzeaux : *Résilience des Systèmes Sociotechniques ; Application à l'Ingénierie Système* ; Génie Logiciel , n° 96, pp. 40-52, mars 2011
- [2] D. Galara : *Vers un langage de représentation des schémas mentaux des exploitants de systèmes de production complexes et à risques* ; Génie Logiciel, n° 96, pp. 11-22, mars 2011
- [3] M. Wolff et R. Mollard : *Prise en compte des facteurs humains dans les processus d'ingénierie système : Quelles tendances pour le futur ?* ; Génie logiciel, 100, pp. 22-27, mars 2012
- [4] J.-P. Bombled : *Le monde très complexe des émergences* ; Deuxième Colloque International sur l'Expérience de la Compléxité, 10-11 janvier 2013, Le Mans
- [5] R. Lieber et D. Fass : *Human systems integration design: Which generalized rationale?* ; Lecture Notes in Computer Science, 6776, pp. 101-109, 2011
- [6] J. Verries : *Approche pour la conception de systèmes aéronautiques innovants en vue d'optimiser l'architecture. Application aux systèmes portes passagers*. Doctorat de l'Université de Toulouse, 2010
- [7] C. Vogel : *Génie Cognitif* ; Masson, 2-225-81382-5, 1988
- [8] M. L. Kuras : *A multi-scale definition of a system* ; MITRE Technical Paper (www.mitre.org), 2006
- [9] J. G. Hall et L. Rapanotti : *Problem Frames for Socio-Technical Systems* ; Requirements Engineering for Socio-Technical Systems, 318-339, Idea Publishing Group, 2005
- [10] C. A. Gunter, E. L. Gunter, M. Jackson et P. Zave : *A reference model for requirements and specifications* ; Software, IEEE, 17 (3), pp. 37-4, 2000
- [11] F. Mayer, J. P. Lavigne et P. Lhoste : *Category theory based approach for IMS modeling* ; 7th IFAC-IMS Workshop, Budapest, Hongrie, 2003
- [12] S. Lahlou : *L'installation du monde. de la représentation à l'activité en situation* ; Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Provence, 2008
- [13] H. Zafiharimalala : *Étude ergonomique pour la consultation sur écran de petite taille de la documentation de maintenance aéronautique* ; Doctorat de l'Université de Toulouse, 2011
- [14] J. J. Gibson : *The Theory of Affordances* ; in Perceiving, Acting, and Knowing, Robert Shaw et John Bransford (réds), 1977
- [15] T. A. Stoffregen : *Affordances as properties of the animal-environment* ; System Ecological Psychology 15(2), pp. 115-134, 2003
- [16] A. T. Chemero et M. T. Turvey : *Complexity, hypersets, and the ecological perspective on perception-action* ; Biological Theory, 2(1), pp. 23-36, 2007
- [17] H. S. Jenkins : *Gibson's "Affordances": Evolution of a Pivotal Concept* ; Journal of Scientific Psychology, pp. 34-45, 2008
- [18] A. Berthoz : *Bases neurales de la décision. Une approche de neurosciences cognitives* ; Annales Médico-psychologiques, 170(2), pp. 115-119, 2012
- [19] G. Chauvet : *Hierarchical functional organization of formal biological systems: A dynamical approach* ; Phil. Trans. R. Soc. Lond. B., 339, pp. 425-481, 1993
- [20] C. Féliot : *Modélisation de systèmes complexes : intégration et formalisation de modèles* ; Doctorat de l'Université de Lille 1, 1997
- [21] O. Bennani, G. Chauvet, P. Chauvet, J. M. Dupont et F., Jouen : *A hierarchical modeling approach of hippocampus local circuit* ; Journal of Integrative Neuroscience, 8(1), pp. 49-76, 2009
- [22] D. Dobre : *Contribution à la modélisation d'un système interactif d'aide à la conduite d'un procédé industriel* ; Doctorat de l'Université Henri Poincaré - Nancy I, 2010
- [23] F. Bouffaron, D. Gouyon, D. Dobre et G. Morel : *Revisiting the interoperation relationships between systems engineering collaborative processes* ; 14th IFAC-INCOM'2012 Symposium, Bucarest, Roumanie, 2012
- [24] M. Jackson : *Problem Frames: Analysing & Structuring Software Development Problems* ; Addison-Wesley Professional, 2000
- [25] J.-P. Meinadier et S. Fiorèse : *Découvrir et comprendre l'ingénierie système* ; Collection AFIS, Cepadues Éditions, 2012

- [26] D. Bjørner : *Triptych Process Model* ; Encyclopedia of Software Engineering, pp.1230-1248, Taylor & Francis, 2010
- [27] B. Alboussière : *Prise en compte du comportement de l'humain dans le prototypage d'un mannequin numérique* ; Rapport de projet, Master Ingénierie de Systèmes Complexes, Université de Lorraine, 2011
- [28] F. Lhote, P. Chazelet et M. Dulmet : *The extension of principles of cybernetics towards engineering and manufacturing* ; Annual Reviews in Control, 23(1), pp. 139-148, 1999
- [29] D.A. Norman : *Affordance, Conventions and Design (Part 2)* ; Note in Don Norman's jnd.org website / human-centered design, 2004

NOTES

- ¹ **Object Role Modelling** : cette variante orientée-fait (www.ormfoundation.org) de « *NIAM* » diffère des méthodes orientées objet en privilégiant la formalisation en *Langage Naturel Binaire* de faits élémentaires exprimant des relations entre objets d'un domaine d'intérêt. Parmi un ensemble de fondements ensemblistes en logique du 1^{er} ordre et d'outillage graphique, le mécanisme de substantivation permet d'exprimer le fait qu'une relation (un verbe) entre deux objets (sujet ou complément) donne lieu à un nouvel objet permettant de réifier la relation d'origine dans un niveau d'abstraction ou dans un domaine différent de celui du fait initial.
- ² **Fact-oriented System Modelling** : cette variante orientée-système [11] complète « *ORM* » et son mécanisme de substantivation en préservant au mieux l'homomorphie (figure 14c) entre l'objet émergent d'un fait (figure 14b) et les objets constituant ce fait d'origine (figure 14a). La mesurabilité (figure 14d) de propriétés de l'objet émergent est la condition de finalisation d'une émergence lors de la construction d'un modèle de système.
- ³ **Affordance** : ce concept d'une théorie écologique de la perception humaine [14] est reconnu comme central au développement des objets numériques qui suggèrent de façon intuitive leur usage. Outre qu'un objet technique est porteur des informations nécessaires à sa perception, celle-ci forme en outre un tout indissociable avec l'action. Si l'affordance fait ainsi référence à la communication symbolique suscitée par les propriétés physiques d'un objet technique [3], nos travaux ont porté sur la communication physique de ces propriétés afin que ces affordances soient perceptibles pour agir [29].

- ⁴ **Event-B** : cette méthode formelle mise en œuvre dans l'atelier « *RODIN* » permet de construire des modèles événementiels de systèmes par raffinements successifs attestés par des conditions de vérification à l'aide d'un assistant de preuve. La conception de modèles est progressive et correcte par construction et chaque modèle satisfait des propriétés d'invariance et de sûreté.
- ⁵ **Physiomatca** : cette plateforme de simulations numériques d'applications physiologiques a été développée à l'origine par (www.vfs-bio.eu). Elle est en cours d'adaptation actuellement en collaboration avec (www.so-innov.fr) pour des applications technico-physiologiques.
- ⁶ **SBML** (Systems Biology Markup Language) : ce langage standardisé (www.sbml.org) est basé sur « *XML* » afin de stocker et faciliter l'utilisation de modèles computationnels décrivant des processus biologiques.
- ⁷ **Harmony-SysML** : ce sont les profils de l'atelier « *IBM® Rational® Rhapsody®* » supportant des processus d'Ingénierie Système Basée sur des transformations de Modèles.

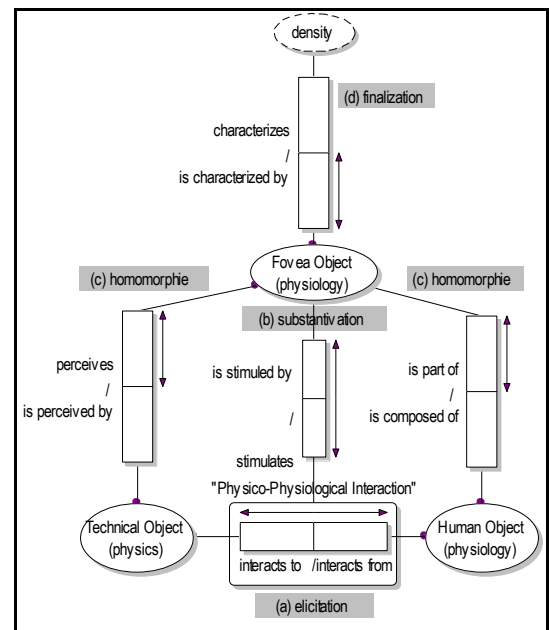


Figure 14 : Fact-oriented System Modeling

8. BIOGRAPHIES

	<p>Gérard Morel est Professeur de l'Université de Lorraine, chercheur au CRAN-UMR CNRS 7039. Après une longue activité de recherche internationale, nationale et locale avec des responsabilités scientifiques importantes dans diverses institutions, il se consacre de nouveau à son métier de base d'enseignant-chercheur. Il poursuit ses travaux ainsi que son encadrement de recherche en Ingénierie de Systèmes et en Génie Automatique. Membre de l'AFIS après avoir été en charge de l'Enseignement et de la Recherche., il assure la responsabilité d'un Master en Ingénierie de Systèmes Complexes qu'il a créé lors de la mise en place du LMD.</p>
	<p>Jean-Marc Dupont, après un doctorat en Physique, a travaillé comme ingénieur de recherche principalement chez VFS-Bio, entreprise créée par le professeur Gilbert Chauvet. Il est co-auteur de plusieurs communications scientifiques relatives aux applications de la Théorie Mathématique de la Physiologie Intégrative en biologie. Après sa collaboration contractuelle au CRAN, il collabore actuellement avec l'entreprise So-Innov pour développer des applications impliquant des interactions physico-physiologiques et promouvoir le prise en compte de ce type de Facteurs Humains en Ingénierie de Systèmes. Il est membre AFIS.</p>
	<p>Romain Lieber débute sa carrière d'Ingénieur dans l'Industrie Aéronautique. Les travaux présentés dans cet article sont en relation avec son activité précédente de recherche en « Ingénierie Système et Facteurs Humains en Maintenance » qu'il a menée sous la supervision de Jean-Luc Marty, Gérard Morel et Dominique Méry dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche au sein du groupe EADS. Il est membre AFIS.</p>
	<p>Fabien Bouffaron est doctorant contractuel au CRAN-UMR CNRS 7039 et chargé d'enseignement à l'Université de Lorraine. Il effectue sa thèse sous la co-direction de Gérard Morel et David Gouyon dans le domaine de l'Ingénierie Système. Ses travaux sur la Spécification Système contribuent au cluster CONNEXION. Il est titulaire d'un Master en Ingénierie Systèmes Complexes et membre de l'AFIS.</p>
	<p>Dominique Méry est professeur d'informatique à l'Université de Lorraine au sein de Telecom Nancy. Il effectue ses travaux de recherches sur les méthodes formelles et leurs applications au sein du laboratoire LORIA. Il est responsable du département Méthodes Formelles du LORIA ainsi que de l'équipe MOSEL. Il est Directeur de l'École Doctorale IAEM Lorraine.</p>
	<p>Frédérique Mayer est Maître de Conférences de l'Université de Lorraine, chercheuse à l'ERPI-EA n° 3767. Ses travaux de recherche ont pour thème la représentation de concepts, de principes et de « patterns » de modélisation système pour leur mise en œuvre en ingénierie système. Frédérique Mayer assure depuis 2005 la présidence et co-présidence du comité technique « social impact of automation » de l'IFAC. Elle est membre AFIS et responsable de la spécialité « management de l'innovation et design industriel » du master design global de l'Université de Lorraine.</p>
	<p>Jean-Luc Marty, après un DEA en informatique industrielle et automatique, a travaillé comme ingénieur d'études dans le domaine du génie logiciel chez Verilog ou il a travaillé sur la mise en place des langages formels dans des processus industriels. Ceci l'a conduit par la suite à évoluer vers l'ingénierie système où il a pratiqué cette activité au sein du groupe EADS dans le domaine aéronautique sur des grands programmes (FANS, A380, A350) et sur des projets de recherches dans le domaine de la maintenance des avions. Au sein de ce même groupe, il travaille maintenant au sein de la société ASTRIUM où il est en charge de l'amélioration du processus d'IS des segments sol utilisateur et d'un axe de recherche sur la maintenance de ces mêmes systèmes. Il est membre de l'AFIS.</p>